

高丽,潘佳文,蒋璐璐,等,2021.一次长生命史超级单体降雹演化机制及双偏振雷达回波分析[J].气象,47(2):170-182. Gao L, Pan J W, Jiang L L, et al, 2021. Analysis of evolution mechanism and characteristics of dual polarization radar echo of a hail caused by long-life supercell[J]. Meteor Mon, 47(2):170-182(in Chinese).

一次长生命史超级单体降雹演化机制及 双偏振雷达回波分析*

高 丽¹ 潘佳文² 蒋璐璐³ 翁之梅¹

1 浙江省台州市气象局,台州 318000

2 厦门市气象局,海峡气象开放实验室,厦门 361012

3 宁波市气象局,宁波 315000

提 要: 2019 年 3 月 21 日一次长生命史超级单体导致浙江省中部多个县(市)降雹,为了研究超级单体得以长时间维持的环境背景及其云物理特征,利用常规资料以及宁波 S 波段双偏振雷达数据,结合粒子相态识别算法,对此次过程的演变进行了分析。结果表明:高空槽前、850 hPa 切变线附近和地面冷锋为超级单体提供了合适的环流背景;风暴传播区域对流有效位能的增加、风暴承载层的平均风向与风暴移动方向相近、风速大、对流风暴沿地面假相当位温梯度大值区向东传播及沿海强垂直风切变,导致中气旋旋转速度和旋转厚度的增加,这些都是对流风暴长时间维持的原因。通过此次降雹单体风暴结构分析发现:整个生命史对流发展非常旺盛,最大反射率维持在 60 dBz 以上,风暴顶维持在 8 km 以上,风暴质心高度出现的三次明显波动,对应三次降雹过程。垂直累积液态含水量(VIL)跃增量虽不及传统指标,但结合垂直累积液态含水量密度(VILD)、VIL 最大值及最大反射率因子大值区,对冰雹业务预报有指示作用。通过降雹单体双偏振特征分析发现:冰雹下落过程中的翻滚现象,导致差分反射率(Z_{dr})值接近 0 dB,水平和垂直偏振波差异导致三体散射特征(TBSS)根部 Z_{dr} 大值区的出现;冰雹降落融化产生的外包水膜现象,使其 Z_{dr} 值增大,相关系数(CC)值减小;通过偏振参数 Z_{dr} 和 CC 特征,有助于识别高空大冰雹;超级单体的有界弱回波区(BWER)附近的 Z_{dr} 柱不仅可指示上升运动,同时对降雹单体不同的成长阶段具有指示作用。

关键词: 超级单体,长生命史,双偏振雷达,粒子相态识别

中图分类号: P412

文献标志码: A

DOI: 10.7519/j.issn.1000-0526.2021.02.004

Analysis of Evolution Mechanism and Characteristics of Dual Polarization Radar Echo of a Hail Caused by Long-Life Supercell

GAO Li¹ PAN Jiawen² JIANG Lulu³ WENG Zhimei¹

1 Taizhou Meteorological Office of Zhejiang Province, Taizhou 318000

2 Laboratory of Straits Meteorology, Xiamen Meteorological Bureau, Xiamen 361012

3 Ningbo Meteorological Bureau, Ningbo 315000

Abstract: On 21 March 2019, a hail process caused by long-life supercell occurred in Zhejiang Province. In order to study the environmental background and microphysical characteristics of supercell which maintained for a long time, we analyze the evolution of this process by using conventional data, Ningbo S-band dual polarization radar data and hydrometeor classification algorithm. The results show that the high-level

* 国家自然科学基金项目(41675029)、浙江省气象科技计划项目(2019QN23, 2019YB12, 2019YB18)和福建省气象局基层科技专项(2019J06)共同资助

2020 年 3 月 5 日收稿; 2020 年 10 月 21 日收修定稿

第一作者,高丽,主要从事雷达气象研究和灾害性天气预报. E-mail:362579619@qq.com

通讯作者,潘佳文,主要从事雷达气象研究. E-mail:358465603@qq.com

trough, 850 hPa shear line and the surface cold front provided suitable background for the supercell. The increase of effective convective potential energy in the storm propagation area, high speed of storm bearing layer, the similarity of the mean wind direction of the storm bearing layer and moving direction of the storm, as well as the eastward propagation of the convective storm along the high pseudo-equivalent potential temperature gradient of surface, and the increase of rotation speed and thickness of mesocyclone produced by the enhancement of strong vertical wind shear in the coastal area, all these factors are the causes of making the convective storm maintain for a long time. Through the analysis of the structure of the hailstorm, the vigorous convection (the maximum reflectivity above 60 dBz, the storm top above 8 km) was found in the whole life cycle, and three obvious fluctuations in the height of storm centroid appeared, corresponding to three hail processes. In this case the vertical integrated liquid water content (VIL) jump increment was lower than the traditional index, but the combination of the vertical integrated liquid water content density (VILD), the maximum VIL and the maximum reflectivity factor could still indicate the hailstorm. The analysis of the dual polarization characteristics, suggest that the tumbling of falling hail resulted in the Z_{dr} close to 0 dB, and the difference between horizontal and vertical polarization waves led to the appearance of large Z_{dr} region at the root of TBSS. The water coated phenomenon made the Z_{dr} value increase and CC value decrease. The polarization parameters Z_{dr} and CC could be used to identify hail in high altitude; Z_{dr} column, near BWER, could not only indicate the ascending motion, but also reveal the different growth stages of hail cell.

Key words: supercell, long-life cycle, dual polarization radar, hydrometeor classification

引 言

冰雹作为对流风暴成熟阶段的产物,其突发性强、破坏力大,常导致严重的灾害性天气,一直是灾害性天气研究领域的重要课题。在导致冰雹的强对流风暴中,超级单体风暴作为组织程度最高的风暴,往往造成的雹灾更为严重,也更值得研究。

随着高时空分辨率天气雷达资料的广泛应用,国内外学者对于中尺度超级单体风暴结构以及动力致雹机制的认识不断深入。最早的超级单体风暴被认为是风暴成熟时的准静稳状态(Browning, 1962),之后大量研究表明其本质特征为一个 γ 中尺度的涡旋(Donaldson, 1970)。Browning and Foote (1976)提出了 Fleming 超级单体冰雹增长模型; Zrnić(1987)通过冰雹雷达回波研究发现大冰雹三体散射特征;陈秋萍等(2015)发现中层中气旋对超级单体降雹过程至关重要,同时降雹时最强风切变中心有突降现象;徐芬等(2016)指出超级单体内部涡旋的维持和生成有利于大冰雹的增长;吴海英等(2017)通过长生命史冰雹的分析得出成熟阶段的超级单体风暴具有高度组织化、显著旋转以及风暴顶辐散等特征;刘治国等(2008)、吴芳芳等(2013)通过

研究发现垂直累积液态含水量高值与雹云有正相关关系;夏文梅等(2016)发现V型回波对冰雹有一定预警提前量。

这些研究加深了对降雹型超级单体结构的认识,但由于单偏振多普勒天气雷达不易探测粒子相态、形状、空间取向等云物理特征,因此上述研究多集中于风暴结构的研究,对于云物理结构方面的研究相对较少。

Seliga and Bringi(1976)提出了双偏振理论以来,双偏振雷达技术日趋成熟,为探知降水粒子的云物理特征提供了有效手段。相较于常规雷达,双偏振雷达通过水平和垂直两个方向的偏振电磁波,获取水凝物的相态、形状、空间取向、密度分布等多种偏振参数(张培昌等, 2018),如:由差分反射率因子 Z_{dr} 推断水凝物尺寸分布(Seliga and Bringi, 1976),由差分相位常数 K_{dp} 估测降雨强度(Sachidananda and Zrnić, 1987),由相关系数(CC)判别混合水凝物相态(Balakrishnan and Zrnić, 1990),以及由水平反射率因子(Z_h)和差分反射率(Z_{dr})衍生的冰雹参数(H_{dr})(Aydin et al, 1986)。曹俊武等(2005), Park et al(2009)基于模糊逻辑算法提出HCA粒子相态分类算法,可以进一步区分水凝物的相态。国内相关研究也取得了颇多成果(刘黎平等, 1992;孙丝雨

等,2013;王洪等,2018;冯晋勤等,2018;潘佳文等,2020b)。但上述研究仅是针对单次降雹过程,对于长生命史超级单体所导致的多次降雹过程关注较少。

随着我国双偏振天气雷达升级改造计划的推进,将进一步提高冰雹等灾害性天气的监测预警能力。2019年3月21日06—11时(北京时,下同)浙江省中部出现的超级单体造成金华、绍兴、台州、宁波等多个县市降雹,维持近6h,但预报难度高,极具研究价值。本文利用常规观测资料、NECP再分析资料和双偏振雷达资料,对此过程中造成多次降雹的长生命史超级单体的维持机制以及冰雹偏振特征进行研究,以提升超级单体降雹机理的认识,进而探讨如何运用双偏振雷达数据提高长历时超级单体降雹的预警能力。

1 资料与方法

所用资料包括:宁波S波段双偏振多普勒雷达(海拔高度458m)每6min一次的探测产品、常规高空探测和地面观测产品、浙江省中尺度站观测数据以及NECP $1^\circ \times 1^\circ$ 再分析资料。

为确保双偏振雷达数据的可靠性,本文参考吴翀(2018)所提出的质量控制算法,使用相关系数及信噪比数据对非气象回波进行了剔除。此外,使用Park et al(2009)基于模糊逻辑算法的HCA粒子相态分类算法,即将雷达回波识别为“小雨、大雨、冰雹、大雨滴、生物、地物、干雪、湿雪、冰晶、霰”共10类水凝物相态。相关研究表明HCA算法可增进对强对流风暴内部微物理结构的了解(潘佳文等,2020a),同时该算法已在WSR-88D双偏振雷达上进行广泛的业务应用。

2 天气过程概述及分析

2.1 天气过程概述

2019年3月20日16—20时,受西南暖湿气流影响,安徽南部、江西北部有多条纬向多单体回波生成并发展,并于21日06时进入浙江省境内。在浙江省有利的环流背景下发展成为超级单体风暴,生命史近6h(21日06—12时),造成浙江省多县(市)冰雹天气。截至21日12时,浙江金华、绍兴、台州、

宁波4个市9个县(区)受灾(如图1),根据灾情收集上报情况,本次过程以直径小于2cm的小冰雹为主,最大冰雹直径为2cm,达到大冰雹标准。此次过程具有降雹时间长、影响范围广、造成灾害重等特点。那么导致多次降雹的超级单体长时间维持的原因是什么?此次超级单体降雹过程又有哪些双偏振特征?

2.2 天气形势分析

21日08时,降雹区位于500hPa冷温槽前,高层200hPa及中低层500、700、850hPa皆有强盛西南气流输送,浙江西部位于高空急流右侧及低空急流出口左前方锋生区,高低空急流耦合有利于对流上升运动发展。同时低层850hPa东北—西南走向切变线横跨浙江中部,地面冷锋南压至浙江西北部,浙江中部(降雹区)位于在高空槽前、850hPa切变线附近和地面冷锋南侧正涡度辐合上升区(图2a)。

从浙江西部代表站衢州站探空曲线上看500hPa存在明显干冷空气入侵, $T-T_d$ 由 12°C (20日20时)增加至 35°C (21日08时,图略),干冷空气叠置于低层强盛的西南急流形成的暖能量舌之上,使得温度垂直递减率增大并形成上干下湿的不稳定层结;同时中低层环境风垂直切变显著增强,20日08时0~3km垂直风切变达 $22\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,0~6km垂直风切变为 $48\text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$,强的垂直风切变有利于对流风暴的高度组织化发展和传播。随着地面冷锋南下伴随低层(850hPa)切变线东移导致浙江中部对流天气发生发展。对比21日08时浙江中南部代表

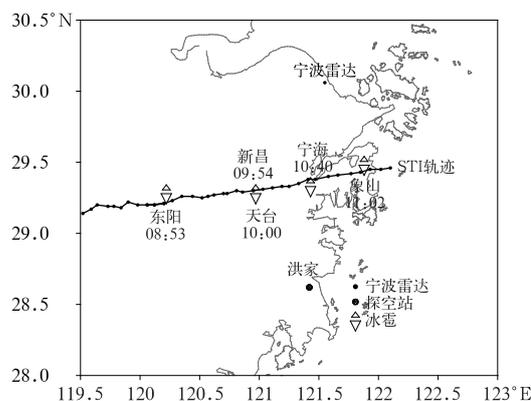


图1 浙江探测站点分布、冰雹落区(县)以及冰雹开始时间

Fig. 1 Distribution of observation stations in Zhejiang, hail falling area (county) and onset time of hail

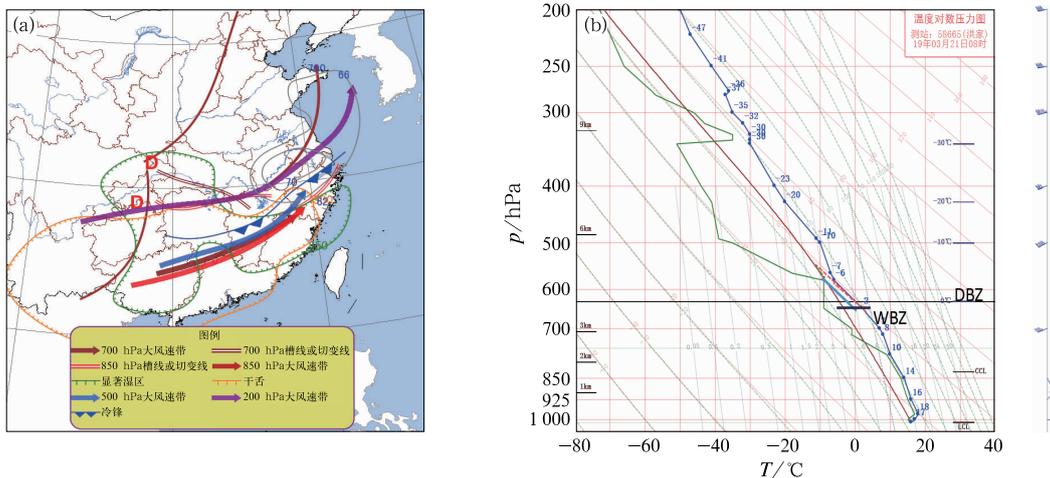


图 2 2019 年 3 月 21 日 08 时中尺度分析(a)和洪家站 $T\text{-log}p$ 图(b)

Fig. 2 Mesoscale analysis (a) and $T\text{-log}p$ diagram at Hongjia Station (b) at 08:00 BT 21 March 2019

站洪家站探空曲线(图 2b)可以发现,低层较高的湿度下,云底低,温度与露点曲线自下而上呈喇叭口形状,上干下湿的垂直结构,250 hPa 及以上的西南风高达 $60 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,高空风的抽吸作用促进对流的发展,有利于冰雹的发生。同时 0°C 层和 -20°C 层高度分别为 4.2 和 7.1 km。需要注意的是,探空数据的 0°C 层高度为干球温度 0°C (DBZ) 层,并不能准确反映冰雹融化层高度。为更准确地指示冰雹融化层高度,根据俞小鼎(2014)的研究,当对流层中层存在明显干层时,湿球温度 0°C (WBZ) 层的高度将明显低于 DBZ, WBZ 可更准确地指示冰雹融化层高度。通过计算 WBZ 高度为 3.8 km,明显低于 DBZ 高度,这一现象说明蒸发冷却引起的水膜再冻结会有利于大冰雹落地。

3 长生命史超级单体维持机制

3.1 不稳定层结

对流风暴为何能维持如此长的生命史且在移动过程中接连产生冰雹?

下面通过讨论对流传播区域($29.0^\circ\text{N}\sim 29.5^\circ\text{N}$, $119.5^\circ\text{E}\sim 122^\circ\text{E}$)对流稳定度($\partial\theta_{sc}/\partial z$)随时间的变化(图 3a),进而分析对流风暴发展和维持的原因。冰雹发生前 20 日 20 时至 21 日 02 时,边界层(1000~850 hPa)以及对流层中层(600~500 hPa)表现为弱不稳定层结,而对流层中下部(850~700 hPa)虽然为稳定层结,但不稳定度呈增加趋势,尤其是 21 日

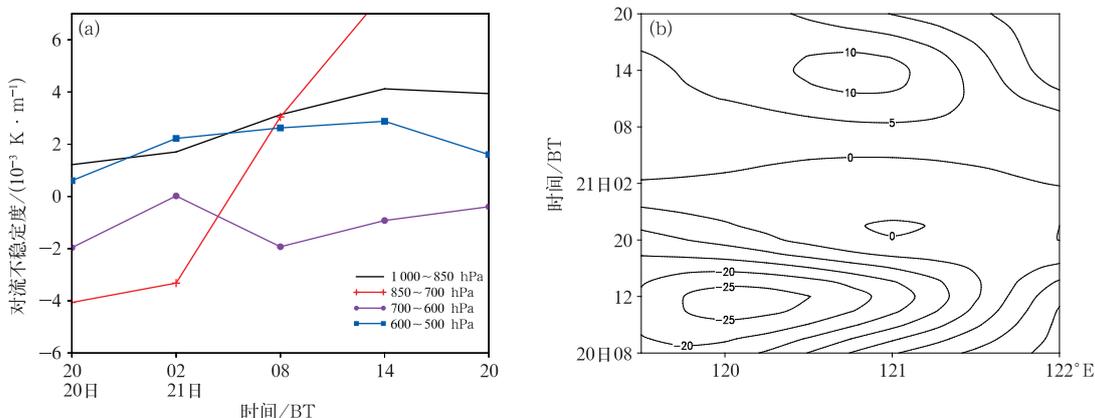


图 3 2019 年 3 月 20 日 20 时至 21 日 20 时对流不稳定度随时间变化(a)和 29.2°N 700 hPa 温度平流(单位: $\text{K} \cdot \text{s}^{-1}$)随时间变化(b)

Fig. 3 Variation of convective instability during 20:00 BT 20 to 20:00 BT 21 (a) and 29.2°N temperature advection (unit: $\text{K} \cdot \text{s}^{-1}$) during 08:00 BT 20 to 20:00 BT 21 (b) in March 2019

08 时,对流层中下部(850~700 hPa)由条件不稳定层结转化为不稳定层结,不稳定度快速累积,一定程度上破坏了对流层中层(700~600 hPa 及 600~500 hPa)不稳定度层结趋于稳定的状态(21 日 02—08 时)。21 日 08 时之后,对流层整体不稳定度增加,不稳定层结增厚。超级单体风暴移动到不稳定的环境中,不断地获取能量,从而得以较长时间的维持和发展。

与其他层明显不同,在超级单体移入影响前及影响后,对流层中下部(850~700 hPa)稳定度呈现快速增长原因何在?西南气流东移使得浙江中部对流层中下层受暖平流影响,从各层的平流变化看(图略),在风暴移近时段 21 日 02—08 时 700 hPa 暖平流有明显增强,同时大于其他层次。从 29.2°N 温度平流沿经向分布时序(图 3b, 700 hPa)可以看出,21 日 02—20 时浙江中部处于暖平流的控制下,而降雹区域 120°~121°E 在 21 日 08—20 时出现暖平流中心,这可能与对流发生过程中潜热释放有关。持续的暖平流输送使得此区域不稳定度持续增长,120.5°~121°E 的 700 hPa 暖平流中心的出现也说明了超级单体在第二次降雹之后仍会继续发展的原因。

3.2 风暴承载层平均风

高晓梅等(2018)发现,风暴承载层平均风向与风暴移动方向越相近,越有利于风暴的维持,通常用 850、700、500、300 hPa 四个层的平均矢量风来代表风暴承载层的平均移向。通过计算:21 日 08 时浙江中南部代表站台州洪家站风暴承载层风速为 $26.4 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,平均风向为 252° ;而降雹风暴平均移动速度为 $20.2 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,相当于风暴承载层平均风的 76.5%,方向为 261° ,偏向风暴承载层右侧 9° 。

风暴承载层风速大同时与降雹风暴移向相近,对风暴移动起到正反馈作用,导致风暴长时间维持,从而出现长生命史的降雹风暴。同时较大风速增强了下沉气流的动量下传作用,有利于风暴组织化的增强。

3.3 地面假相当位温演变

图 4 为风暴路径与地面假相当位温的演变,由图可知,21 日 09—11 时浙江省中部一直存在假相当位温的梯度大值区。在此期间,超级单体风暴位于高位温舌的顶端,其移动路径与假相当位温等值线密集带相平行并偏向于冷区一侧。锋面作为不同性质气团的交界面,其两侧通常存在明显的温度、湿度、压力对比,假相当位温作为一种综合反映温度、气压、湿度的物理量,在此次过程中,其梯度大值区与地面冷锋在空间上存在较好的对应关系。此时的假相当位温梯度大值区同样具备地面锋面所具有的较强斜压性。在本次过程中,超级单体沿着假相当位温梯度大值区移动,该区域附近的强斜压性有利于水平涡度的形成和维持,从而使得超级单体得以长时间维持和发展。

3.4 深厚的垂直风切变和内部旋转的维持

风暴的发展维持、形态演变与垂直风切变密切相关,强而深厚的垂直风切有助于对流风暴的组织化以及发展加强(张建军等,2016)。王秀明等(2015)发现:低层较高湿度下,云底低,强风垂直切变与强的垂直运动有对应关系,从而使风暴高度组织化,进而成为长生命史风暴。同时垂直风切变通过水平涡度向垂直涡度的转换和积累,使风暴内部涡度结构发生改变,从而使风暴内部环流维持时间更长、结构更加紧密(俞小鼎等,2006)。

通过风暴加强前浙江省 0~6 km 风切变(图略)

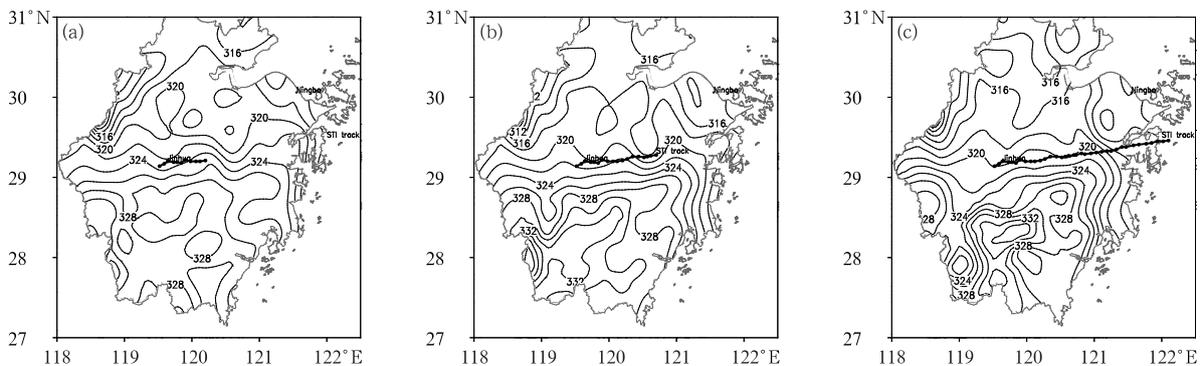


图 4 2019 年 3 月 21 日 09 时(a),10 时(b),11 时(c)地面假相当位温分析(单位:K)

Fig. 4 Analysis of the potential pseudo-equivalent temperature (unit: K) at 09:00 BT (a), 10:00 BT (b), 11:00 BT (c) March 21 2019

可以看到,21 日 02 时之前浙江中部一带存在 $34 \sim 38 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的垂直风切变,风暴进入浙江后 21 日 08 时, $36 \sim 48 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ 的强垂直风切变中心东移到浙江东部,尤其是宁波、台州沿海,这也说明了超级单体进入宁波之后仍出现发展加强的原因。强风垂直切变环境下,风暴出现明显的旋转特征,水平旋转的产生加速了风暴内上升气流和下沉气流的共存,通过宁波雷达探测到风暴旋转速度(图 5)可以看出:在强的风垂直切变条件下,自 08:42 金华出现中气旋现象,至 11:15 宁波象山回波出海,中气旋维持近 3 h。郑媛媛等(2004)研究发现:持续 3 个体扫以上的中气旋与冰雹等强对流天气具有很大的相关性。在三次降雹过程中,与常规的降雹过程类似,皆出现有界弱回波区(BWER)坍塌的现象(图略),但中气旋的最大旋转速度却仍然维持甚至有所增强,直至降雹结束中气旋的旋转速度才缓慢减弱,并在中层(2~6 km)维持,这一现象与潘玉洁等(2008)的研究结果相近。

俞小鼎等(2006)发现, 0°C 层以上 1.5~2 km 是冰雹增长的关键区域,因此 0°C 以上的持续中气旋旋转更有利于冰雹的产生。在后两次冰雹过程中,中气旋的最大旋转高度超过 0°C 层(3.8 km)并呈上升趋势。同时中气旋旋转速度增大,旋转高度升高,气旋式旋转柱加厚,分别呈现出 2 或 3 km 的增长。由于中气旋的强烈旋转造成明显有界弱回

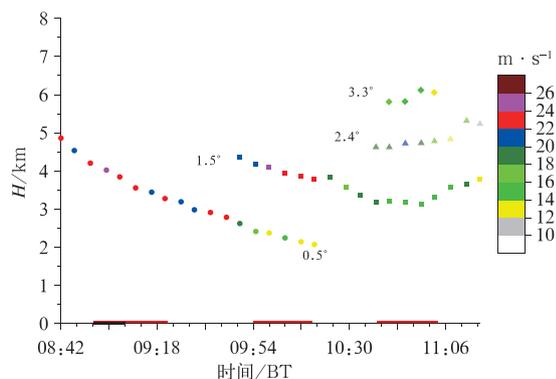


图 5 2019 年 3 月 21 日 08:42—11:06 中气旋高度及不同仰角旋转速度 (横轴上红色线段为降雹时长,与图 8 一样)

Fig. 5 Height of mesocyclone and rotation speed at different elevations during 08:42 BT to 11:06 BT 21 March 2019 (Red lines on horizontal axis; duration of hailfall, same as Fig. 8)

波、回波倾斜及悬垂结构的产生,使得超级单体组织化程度更高,也是此降雹风暴长时间维持的原因。

4 雷达回波特征演变分析

4.1 回波演变

导致此次浙江中部连续降雹过程的对流风暴,于 3 月 21 日 02:30 在江西省北部生成,其在东移过程中与多个对流单体合并(图略),05 时该对流单体进入浙江省境内,并在衢州市开化县导致了地面短时大风(11 级)。

08:42 对流单体位于宁波雷达西南方 $235^\circ/182 \text{ km}$ 处,单体的南侧呈现出钩状回波特征(图 6a),钩状回波东侧具有宽广的倒“V”字型前侧入流缺口(FIN),与之对应,单体的西侧存在后侧入流缺口(RIN),这些都是经典超级常见的特征。而风暴相对径向速度场上表现为结构对称的中气旋(图 6b),最大转动速度为 $21 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$,达到强中气旋的标准(Andra,1997)。代表较强的前侧入流和后侧下沉气流的 FIN 和 RIN 以及强中气旋的同时存在,预示着该超级单体已发展至成熟阶段,并于 08:53 发生第一次降雹。

09:32 在超级单体的后侧,有对流单体 B 通过云桥与超级单体 A 建立连接(图 6c),单体 B 在速度场上具有中尺度对流涡旋(MCV),其转动速度为 $7 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ (图 6d)。在后续时次,对流单体 B 逐渐并入超级单体 A,对流单体的合并使得超级单体 A 得以维持并增强,其最大转动速度也有明显提升(图 5)。

09:54 超级单体 A 再次发生降雹,在其西南侧不断有对流单体生成, Z_h 强中心迅速增大至 50 dBz 后并入超级单体 A。10:17 超级单体 A 的形态已初步呈现出弓状回波的特征(图 7)。当超级单体嵌入中尺度对流系统中(如飑线、弓状回波等),往往具有更长的生命史,并常造成更严重的灾害(Atkins et al,2005)。在本次过程中则表现为超级单体 A 的旋转速度一直维持在中气旋的强度,并于 10:40 第三次降下冰雹。

截至 11:14 回波主体东移入海,超级单体 A 在近 3 h 的时间内共发生三次降雹过程。因此,有必要对超级单体 A 的风暴结构和偏振特征继续进行分析。

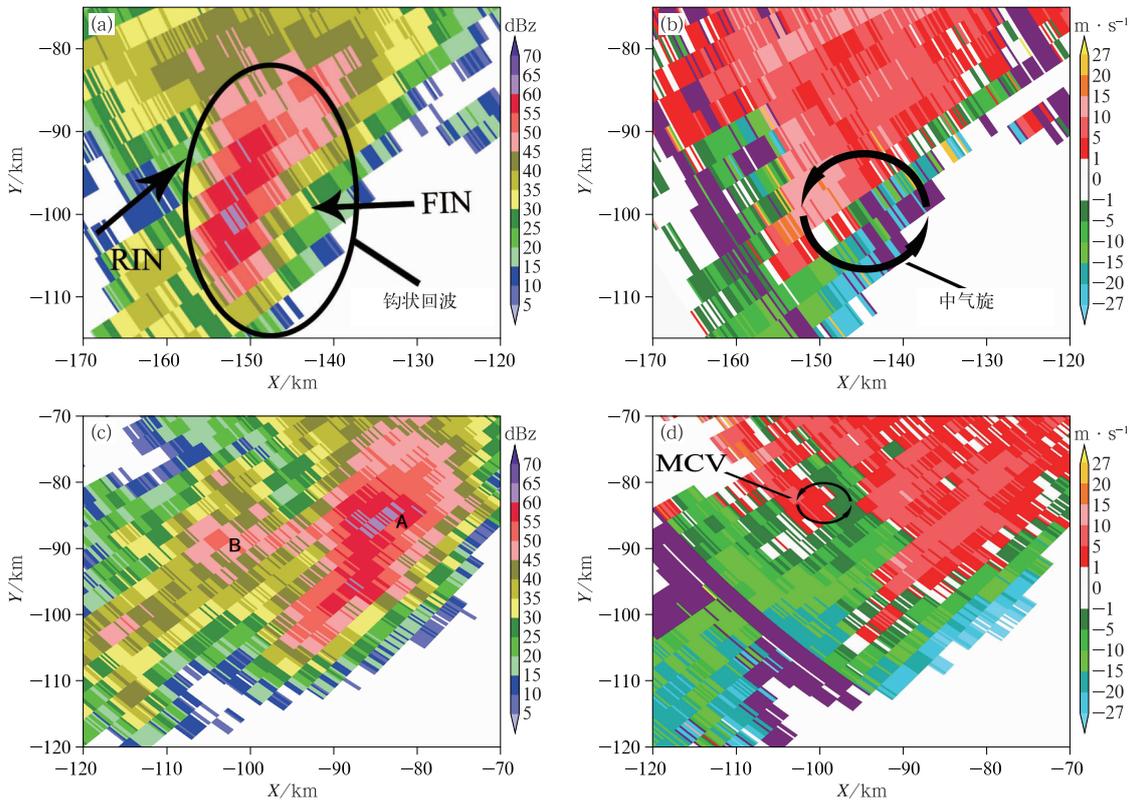


图 6 2019 年 3 月 21 日 08:42(a,b)和 09:32(c,d)时 0.5° 仰角水平反射率因子(a,c)和径向速度(b,d)
 Fig. 6 Z_h (a, c), V_r (b, d) observed at 0.5° elevation at 08:42 BT (a, b) and (c, d) 09:32 BT 21 March 2019

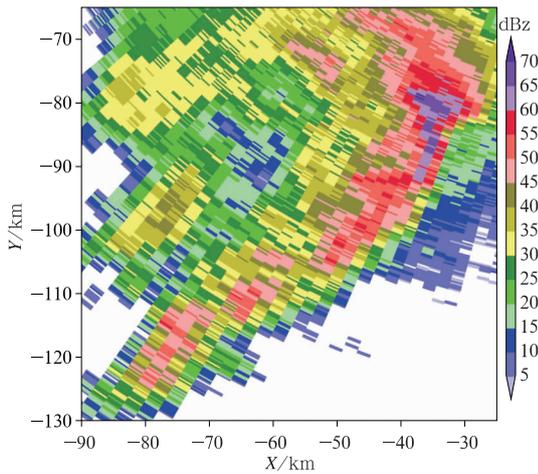


图 7 2019 年 3 月 21 日 10:17 时 0.5° 仰角水平反射率因子
 Fig. 7 Z_h observed at 0.5° elevation at 10:17 BT 21 March 2019

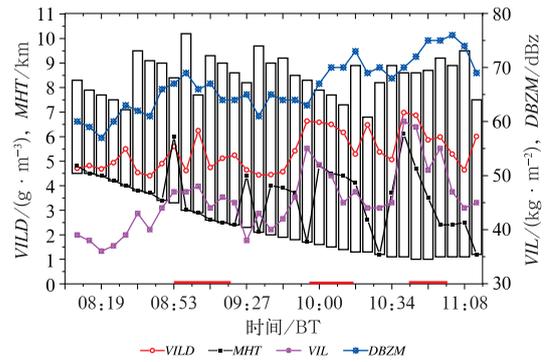


图 8 2019 年 3 月 21 日 08:08—11:14
 超级单体风暴结构随时间的演变

Fig. 8 Evolution of supercell storm structure with time during 08:08 BT to 11:14 BT 21 March 2019

4.2 风暴结构演变

图 8 为宁波雷达所观测的超级单体 A 的时间演变,白色柱体为风暴高度,横坐标红色实线为三次降雹发生时间。在风暴发展过程中,三次降雹过程

最大反射率因子(DBZM)都在 59 dBz 以上,第三次降雹时 DBZM 已增至 76 dBz。通过风暴最大反射率因子高度(MHT)、顶高、底高(柱体)的演变趋势(左侧坐标)可以看出三次降雹过程的变化:起始对流风暴位于对流层中层、质心高度偏高,并逐渐向下伸展,整个生命史中对流发展非常旺盛,最大反射率

维持在 60 dBz 以上,风暴顶维持在 8 km 以上,风暴质心的高度出现了三次明显的波动,并对应三次降雹过程。由于第二次和第三次降雹过程对流单体与超级单体发生合并作用,09:32 和 10:34, MHT、VIL、VILD 表现为同步快速增长,降雹前 1 个体扫 VIL 分别达到最大值 55 和 60 $\text{kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 。

吴芳芳等(2013)通过一系列超级单体特征研究发现垂直累积液态含水量(VIL)和冰雹尺度存在正相关。刁秀广等(2008)发现降雹风暴在成熟阶段有明显的 VIL 跃增现象,通常在 $16 \sim 20 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 较为有利。同时其附加指标垂直累积含水量密度 $\text{VILD} \geq 4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 出现冰雹概率极大,因此业务中经常关注 VIL 的跃增、 $\text{VILD} \geq 4 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 及 VIL 持续高值区($60 \sim 70 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$),也经常作为是直径大于 2 cm 大冰雹预报指标,但是对于直径小于 2 cm 的冰雹,由于 VIL 极大值只有 $40 \sim 50 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$,所以在临近预报中经常被忽视。通过三次冰雹过程的参数变化(表 1),在降雹前 VIL 有 $11 \sim 14 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 的跃增,由于冰雹尺度小,其增量不及传统指标,但是 VILD 达 $6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$ 左右、VIL 最大值在 $50 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$ 及 DBZM 达 70 dBz 上下,在业务预报中匹配应用应加强关注。

表 1 三次降雹(金华、台州、宁波)过程参数变化

Table 1 Parameters of three hailstorms in Jinhua, Taizhou and Ningbo

降雹区域	$\Delta\text{VIL}/(\text{kg} \cdot \text{m}^{-2})$	$\text{VILD}/(\text{g} \cdot \text{m}^{-3})$	DBZM/dBz
金华东阳	36~48	6.23	69
台州天台	44~55	6.63	70
宁波宁海	44~60	6.98	76

4.3 双偏振特征分析

4.3.1 冰雹特征

众所周知,由于冰雹介电常数低、空间取向随机、偏振特征与雨滴明显不同的特点,可以将水凝物的相态区分开来。以往的研究表明:相较于只使用 Z_h 进行冰雹的识别,综合运用 Z_{dr} 和 CC ,可更为准确地识别出冰雹在对流单体中的位置及其相态特征(Aydin et al, 1986)。

图 9 显示了第三次降雹 10:40 时 0.5° 仰角的 Z_h 、 Z_{dr} 、 CC 和粒子相态识别结果。此时, Z_h 强中心超过 65 dBz,最大值达 67.5 dBz(图 9a)。 Z_{dr} 低值区

位于该区域的南侧,最小数值为负值(图 9b)。由粒子相态识别结果可知,在冰雹所在区域呈现出低 Z_{dr} 值区域被高 Z_{dr} 值区域包围的现象(图 9d)。究其原因:大冰雹在下落过程中由于翻滚现象,使得 Z_{dr} 值接近 0 dB。但其周围的冰雹在下落时融化,产生外包水膜现象使得 Z_{dr} 值上升。结合 CC 可以发现(图 9c),冰雹所在区域 CC 值明显下降,说明此处的冰雹已发生融化,存在混合相态的水凝物。

4.3.2 三体散射特征(TBSS)

雷达探测大冰雹时,常观测到三体散射特征(TBSS)。TBSS 是一种虚假回波,表现为在大冰雹区的径向远侧无回波区出现弱的 Z_h 回波束,可作为判别大冰雹的充分但非必要条件(Lemon, 1998)。

10:51 宁波雷达 1.5° 仰角出现 TBSS 现象, Z_h 强中心达 72.5 dBz,在其径向远端的弱回波(< 20 dBz)伸展长度达 15 km。由图 10b 和 10c 可以发现,冰雹区的 Z_{dr} 几乎为 0,而 TBSS 的根部 Z_{dr} 有大值区(5.9 dB),这是由于冰雹的散射波被地面反射,水平偏振和垂直偏振波的反射差异所致; CC 值在冰雹区数值小,在 TBSS 的根部 CC 值更小(0.22);并随距离增大逐渐减小到负值,这与 Kumjian et al (2010)归纳的 TBSS 的偏振特征相符(见图 10 中圆圈)。

然而,由于强回波后侧常有较强降雨回波存在, TBSS 的 Z_h 弱回波常被遮掩无法辨别(廖玉芳等, 2007),09:04 宁波雷达 1.5° 仰角 Z_h 强中心达 63 dBz,由 HCA 识别结果可知,此时 Z_h 强中心附近有冰雹存在,然而在 Z_h 强中心的径向远端还存在降水回波,因此无法辨别是否存在 TBSS(图略)。但通过结合 Z_{dr} 和 CC 等偏振参数,可以发现存在 Z_{dr} 激增、 CC 降低的 TBSS 偏振特征,从而提高了对 TBSS 的辨识能力。

4.3.3 Z_{dr} 柱特征

先前的研究表明,强上升气流有利于冰雹的产生,因为长时间停留在具有过冷云(雨)滴的冻云中是其尺寸增长的主要方式(许焕斌, 2012)。 Z_{dr} 柱是对流风暴中最为常见的偏振特征之一,常位于上升气流附近,可用于指示上升气流的存在(潘佳文等, 2020a; 2020b)。由图 11 可知,在超级单体的 BWER 附近存在 Z_{dr} 大值区(图 11b, 11d 中黑色圆圈处),其伸展高度可达 1.5° 仰角(大约 6.8 km)。

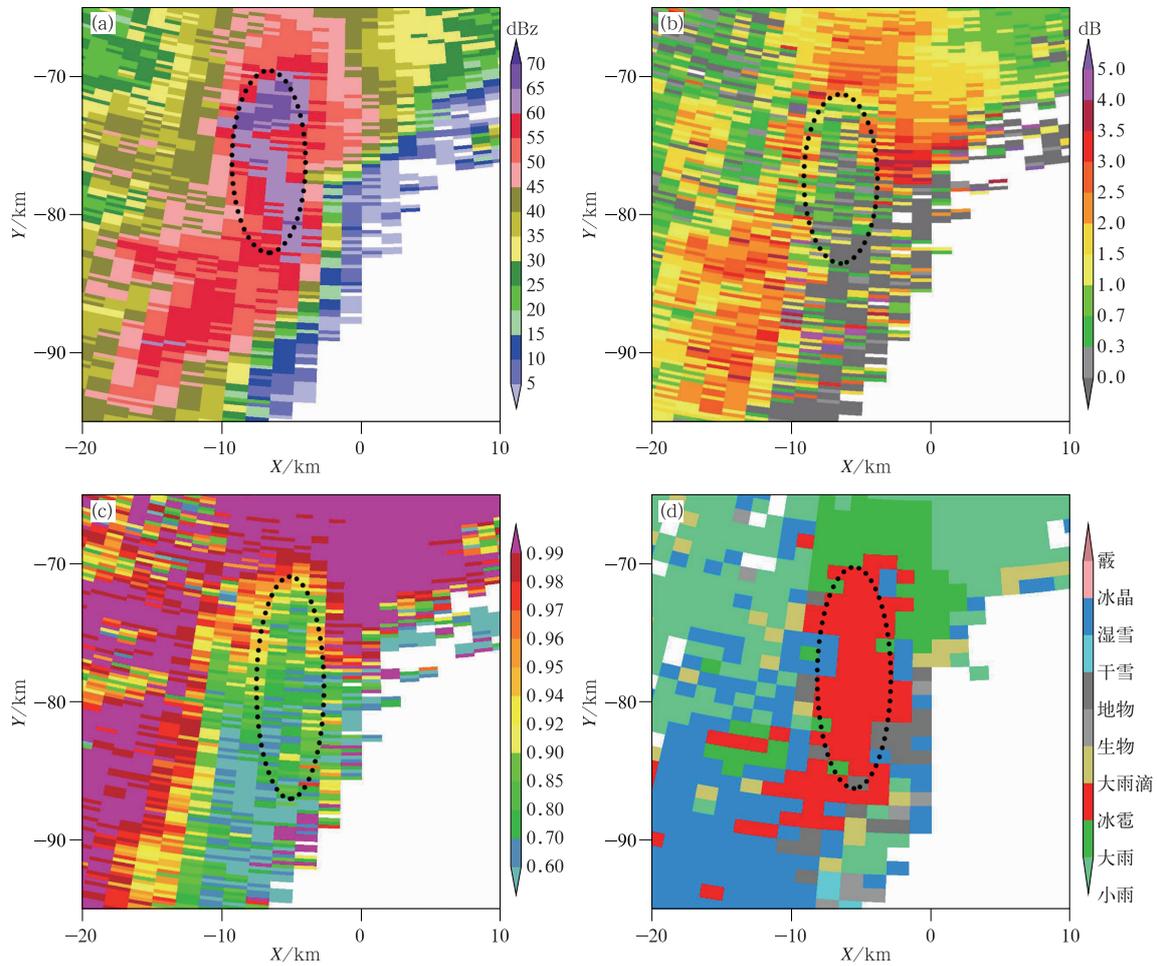


图 9 2019 年 3 月 21 日 10:40 时 0.5° 仰角水平反射率因子(a), 差分反射率因子(b), 相关系数(c)和粒子相态识别结果(d)
(图中黑色圆圈是降雹区)

Fig. 9 Z_h (a), Z_{dr} (b), CC (c) and HCA (d) observed at 0.5° elevation at 10:40 BT 21 March 2019
(black circle: hail area)

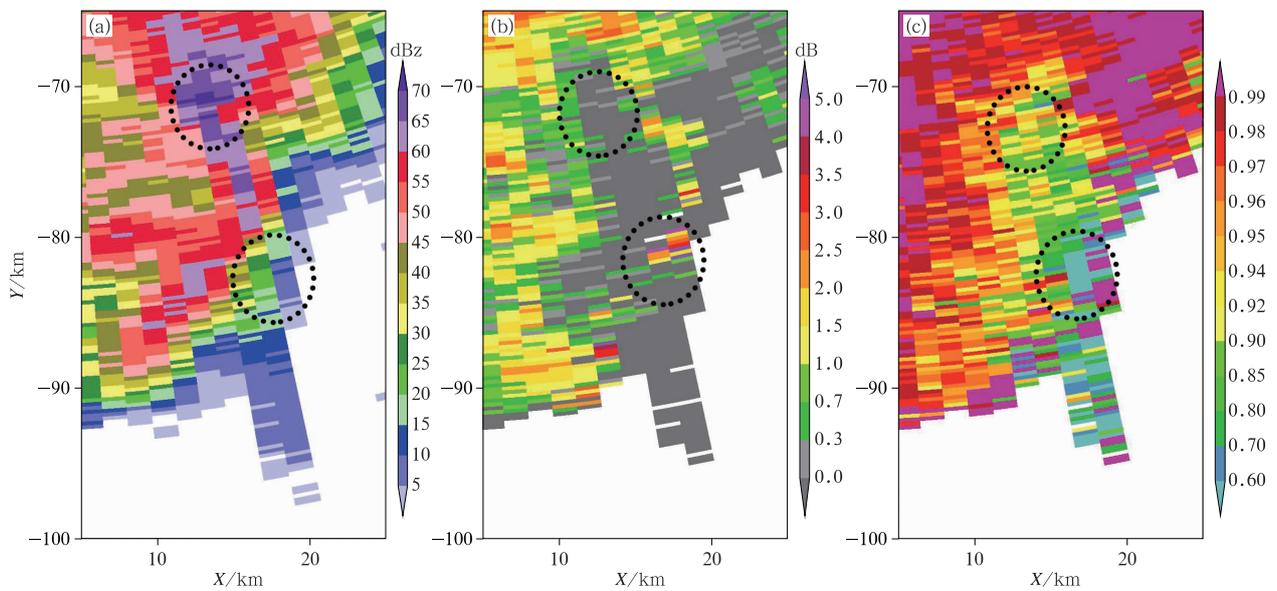


图 10 2019 年 3 月 21 日 10:51 时 1.5° 仰角水平反射率因子(a), 差分反射率因子(b), 相关系数(c)

Fig. 10 Z_h (a), Z_{dr} (b) and CC (c) observed at 1.5° elevation at 10:51 BT 21 March 2019

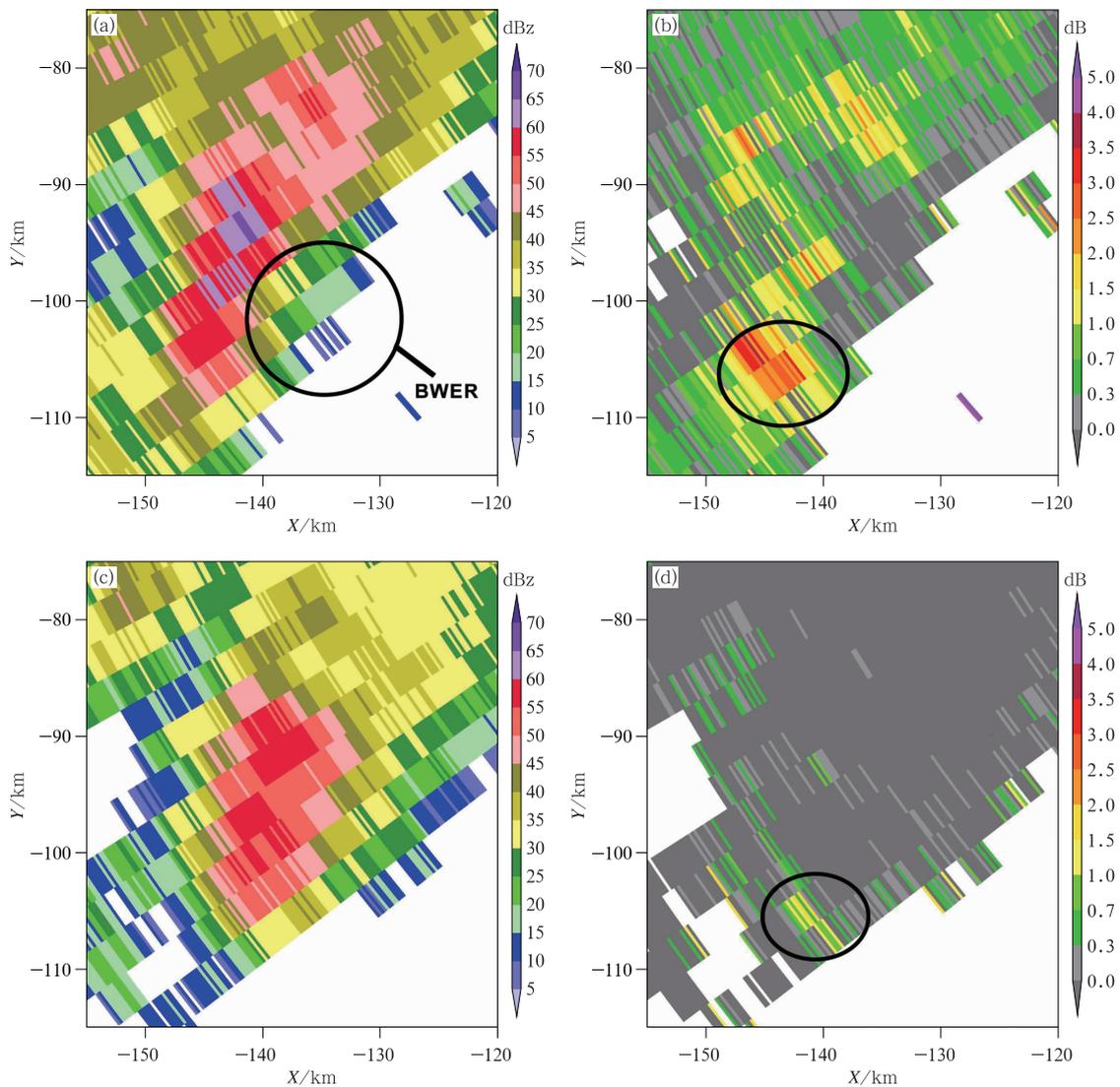


图 11 2019 年 3 月 21 日 08:47 时 0.5°(a,b)和 1.5°(c,d)仰角水平反射率因子(a,c)、差分反射率因子(b,d)
 Fig. 11 Z_h (a, c), Z_{dr} (b, d) observed at 0.5° (a, b) and 1.5° (c, d) elevations at 08:47 BT 21 March 2019

沿宁波雷达 233°径向做垂直剖面,可以发现 Z_{dr} 柱主要位于 BWER 内侧及回波墙处(图 12a), $Z_{dr} > 1$ dB 区域的最大伸展高度可达 -20°C 层(图 12b)。同时伴有 CC 数值下降的现象(图 12c),说明此处存在混合相态粒子,冰雹正经历湿增长。

随后时次, Z_{dr} 柱的伸展高度不断下降,并于 09:04 降至最低(图 12e),其垂直伸展高度低于 -10°C ,此时地面正发生降雹。需要注意的是,在 Z_{dr} 柱后侧,距离雷达 176 km 处,存在 Z_{dr} 值骤增(图 12e)、CC 值骤减(图 12f)区域,此为 TBSS 在垂直结构上的偏振特征。

在此后两次降雹过程中, Z_{dr} 柱的伸展高度均呈现出相同的发展趋势,其伸展高度不断增长,分别于 09:21 和 10:12 达到最大, $Z_{dr} > 1$ dB 区域均触及

-20°C 层,随后逐渐下降,于降雹时降至最低。

在此后两次降雹过程中, Z_{dr} 柱的伸展高度均呈现出相同的发展趋势,其伸展高度不断增长,分别于 09:21 和 10:12 达到最大, $Z_{dr} > 1$ dB 区域均触及 -20°C 层,随后逐渐下降,于降雹时降至最低。

5 结论与讨论

本文针对 2019 年 3 月 21 日发生在浙江省一次长生命史的超级单体多次降雹过程,利用常规观测资料以及宁波 S 波段双偏振雷达观测数据,对超级单体得以长时间维持的环境参数做出分析,并对导致多次降雹的超级单体的双偏振雷达特征进行了分析。结果表明:

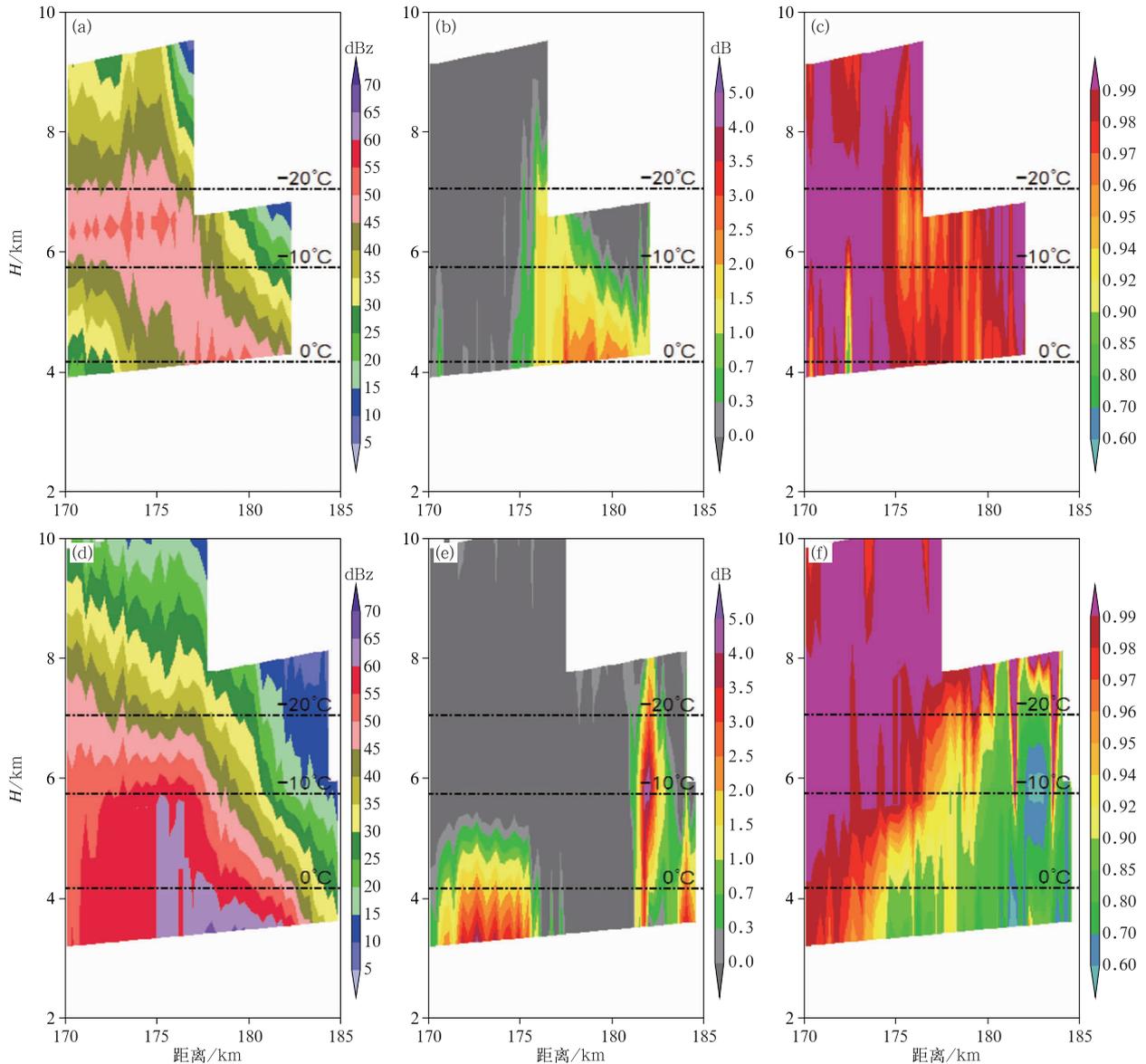


图 12 2019 年 3 月 21 日 08:47 沿 233° 径向(a, b, c)和 09:04 沿 232° 径向(d, e, f)

水平反射率因子(a, d)、差分反射率因子(b, e)、相关系数(c, f)垂直剖面

Fig. 12 Vertical cross-section of Z_h (a, d), Z_{dr} (b, e), CC (c, f) along the 233° azimuth at 08:47 BT (a, b, c) and along the 232° azimuth at 09:04 BT (d, e, f) 21 March 2019

(1) 降雹区位于在 500 hPa 高空槽前、850 hPa 切变线附近和地面冷锋南侧正涡度辐合上升区中, 干冷空气的侵入导致温度直减率增加, 合适的 0°C 和 -20°C 层为降雹提供了合适的环境条件。

(2) 持续的暖平流输送导致风暴传播区域不稳定性增长, 风暴承载层的平均风向与系统移动方向接近, 风速大, 风暴沿地面假相当位温梯度大值区向东传播, 强垂直风切变导致的风暴中气旋旋转速度和旋转厚度增加, 使得风暴得以长时间维持。

(3) 分析长生命史降雹风暴结构, 发现三次降雹

过程的变化: 起始对流风暴位于对流层中层、质心高度偏高, 并逐渐向下伸展, 整个生命史中对流发展非常旺盛, 最大反射率维持在 60 dBz 以上, 风暴顶维持在 8 km 以上, 风暴质心高度三次明显的波动对应三次降雹过程。虽然 VIL 增量 ($11 \sim 14 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-2}$) 不及传统指标, 但结合 VILD ($> 6 \text{ g} \cdot \text{m}^{-3}$)、VIL 大值区及 DBZM (70 dBz 左右) 大值区仍可对冰雹业务预报有指示作用。

(4) 大冰雹在下落过程中由于翻滚现象, 其 Z_{dr} 值接近 0 dB, 而冰雹散射波被地面反射, 水平偏振

和垂直偏振波的反射差异,导致 TBSS 根部 Z_{dr} 有大值区(5.9 dB)的出现。随着冰雹降落融化,其表面存在外包水膜现象使得 Z_{dr} 值增大,CC 值减小。通过偏振参数 Z_{dr} 和 CC 特征有助于识别高空的大冰雹。

(5) 超级单体的 BWER 附近 Z_{dr} 柱的存在标志着强烈的上升运动。在三次降雹过程中, Z_{dr} 柱的伸展高度呈现相似的发展趋势:即冰雹高空增长阶段, Z_{dr} 伸展高度不断增长, $Z_{dr} > 1$ dB 区域可达 -20°C 层;降雹阶段, Z_{dr} 柱的高度显著下降,于地面降雹时降至最低。

本文仅为一次长生命史超级单体降雹过程的观测分析结果,仍以定性分析为主。未来仍需通过更多的个例研究,例如针对不同冰雹尺寸的偏振特征进行定量分析,为双偏振雷达的大规模业务应用提供参考。

参考文献

- 曹俊武,刘黎平,葛润生,2005. 模糊逻辑法在双线偏振雷达识别降水粒子相态中的研究[J]. 大气科学,29(5):827-836. Cao J W, Liu L P, Ge R S, 2005. A study of fuzzy logic method in classification of hydrometeors based on polarimetric radar measurement[J]. Chin J Atmos Sci, 29(5):827-836(in Chinese).
- 陈秋萍,陈齐川,冯晋勤,等,2015. “2012. 4. 11”两个强降雹超级单体特征分析[J]. 气象,41(1):25-33. Chen Q P, Chen Q C, Feng J Q, et al, 2015. Analysis of two severe hail supercell storms on 11 April 2012[J]. Meteor Mon, 41(1):25-33(in Chinese).
- 刁秀广,朱君鉴,黄秀韶,等,2008. VIL 和 VIL 密度在冰雹云判据中的应用[J]. 高原气象,27(5):1131-1139. Diao X G, Zhu J J, Huang X S, et al, 2008. Application of VIL and VIL density in warning criteria for hailstorm[J]. Plateau Meteor, 27(5):1131-1139(in Chinese).
- 冯晋勤,张深寿,吴陈锋,等,2018. 双偏振雷达产品在福建强对流天气过程中的应用分析[J]. 气象,44(12):1565-1574. Feng J Q, Zhang S S, Wu C F, et al, 2018. Application of dual polarization weather radar products to severe convective weather in Fujian[J]. Meteor Mon, 44(12):1565-1574(in Chinese).
- 高晓梅,孙雪峰,秦瑜蓬,等,2018. 山东一次强对流天气的环境条件和对流风暴特征[J]. 干旱气象,36(3):447-455. Gao X M, Sun X F, Qin Y P, et al, 2018. Environmental conditions and convective storm features of a severe convective weather process in Shandong Province[J]. J Arid Meteor, 36(3):447-455(in Chinese).
- 廖玉芳,俞小鼎,吴林林,等,2007. 强雹暴的雷达三体散射统计与个例分析[J]. 高原气象,26(4):812-820. Liao Y F, Yu X D, Wu L L, et al, 2007. Statistic and case studies on radar three body scattering of severe hailstorm[J]. Plateau Meteor, 26(4):812-820(in Chinese).
- 刘黎平,徐宝祥,王致君,等,1992. 用 C 波段双线偏振雷达研究冰雹云[J]. 大气科学,16(3):370-376. Liu L P, Xu B X, Wang Z J, et al, 1992. Study of hail with C-B and dual linear polarization radar[J]. Chin J Atmos Sci, 16(3):370-376(in Chinese).
- 刘治国,俞小鼎,陶健红,等,2008. 青藏高原东北侧雹云单体最大垂直累积液态含水量的演变特征及其在降雹定时判断中的应用[J]. 气象学报,66(4):609-620. Liu Z G, Yu X D, Tao J H, et al, 2008. Vertically integrated liquid water content characters of hail cells in the northeast Tibetan Plateau and its application in estimation of hail-shooting time[J]. Acta Meteor Sin, 66(4):609-620(in Chinese).
- 潘佳文,蒋璐璐,魏鸣,等,2020a. 一次强降水超级单体的双偏振雷达观测分析[J]. 气象学报,78(1):86-100. Pan J W, Jiang L L, Wei M, et al, 2020a. Analysis of a high precipitation supercell based on dual polarization radar observations[J]. Acta Meteor Sin, 78(1):86-100(in Chinese).
- 潘佳文,魏鸣,郭丽君,等,2020b. 闽南地区大冰雹超级单体演变的双偏振特征分析[J]. 气象,46(12):1608-1620. Pan J W, Wei M, Guo L J, et al, 2020b. Dual-polarization radar characteristics analysis of the evolution of heavy hail supercell in Southern Fujian[J]. Meteor Mon, 46(12):1608-1620(in Chinese).
- 潘玉洁,赵坤,潘益农,2008. 一次强飑线内强降水超级单体风暴的单多普勒雷达分析[J]. 气象学报,66(4):621-636. Pan Y J, Zhao K, Pan Y N, 2008. Single-Doppler radar observation of a heavy precipitation supercell on a severe squall line[J]. Acta Meteor Sin, 66(4):621-636(in Chinese).
- 孙丝雨,沈永海,霍苗,等,2013. 双线偏振雷达在一次强降雹过程中的初步应用[J]. 暴雨灾害,32(3):249-255. Sun S Y, Shen Y H, Huo M, et al, 2013. Preliminary application of dual-polarization weather radar in a severe hail event[J]. Torr Rain Dis, 32(3):249-255(in Chinese).
- 王洪,吴乃庚,万齐林,等,2018. 一次华南超级单体风暴的 S 波段偏振雷达观测分析[J]. 气象学报,76(1):92-103. Wang H, Wu N G, Wan Q L, et al, 2018. Analysis of S-band polarimetric radar observations of a hail-producing supercell[J]. Acta Meteor Sin, 76(1):92-103(in Chinese).
- 王秀明,俞小鼎,周小刚,2015. 中国东北龙卷研究:环境特征分析[J]. 气象学报,73(3):425-441. Wang X M, Yu X D, Zhou X G, 2015. Study of Northeast China torandoes: the environmental characteristics[J]. Acta Meteor Sin, 73(3):425-441(in Chinese).
- 吴翀,2018. 双偏振雷达的资料质量分析,相态识别及组网应用[D]. 南京信息工程大学,150. Wu C. 2018. Data quality analysis, hydrometeor classification and mosaic application of polarimetric radars in China[D]. Nanjing University of Information Science and Technology, 150(in Chinese).
- 吴芳芳,俞小鼎,张志刚,等,2013. 苏北地区超级单体风暴环境条件与雷达回波特征[J]. 气象学报,71(2):209-227. Wu F F, Yu X D, Zhang Z G, et al, 2013. A study of the environmental conditions and radar echo characteristics of the supercell-storms in northern Jiangsu[J]. Acta Meteor Sin, 71(2):209-227(in Chinese).

- 吴海英,陈海山,刘梅,等,2017.长生命史超级单体结构特征与形成维持机制[J].气象,43(2):141-150. Wu H Y, Chen H S, Liu M, et al, 2017. Structure characteristics, formation and maintenance mechanism of supercell with long life cycle[J]. Meteor Mon, 43(2):141-150(in Chinese).
- 夏文梅,王晓君,孙康远,等,2016.V型缺口在C波段多普勒雷达中的应用研究[J].气象,42(1):67-73. Xia W M, Wang X J, Sun K Y, et al, 2016. Application study of 'V' notch used in C band Doppler radar[J]. Meteor Mon, 42(1):67-73(in Chinese).
- 徐芬,郑媛媛,肖卉,等,2016.江苏沿江地区一次强冰雹天气的中尺度特征分析[J].气象,42(5):567-577. Xu F, Zheng Y Y, Xiao H, et al, 2016. Mesoscale characteristics of a severe hail event over the area along Yangtze River in Jiangsu[J]. Meteor Mon, 42(5):567-577(in Chinese).
- 许焕斌,2012.强对流云物理及其应用[M].北京:气象出版社. Xu H B, 2012. The Physics of Severe Convective Storms and Its Application[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 俞小鼎,2014.关于冰雹的融化层高度[J].气象,40(6):649-654. Yu X D, 2014. A note on the melting level of hail[J]. Meteor Mon, 40(6):649-654(in Chinese).
- 俞小鼎,郑媛媛,张爱民,等,2006.安徽一次强烈龙卷的多普勒天气雷达分析[J].高原气象,25(5):914-924. Yu X D, Zheng Y Y, Zhang A M, et al, 2006. The detection of a severe tornado event in Anhui with China new generation weather radar[J]. Plateau Meteor, 25(5):914-924(in Chinese).
- 张建军,王咏青,钟玮,2016.飚线组织化过程对环境垂直风切变和水汽的响应[J].大气科学,40(4):689-702. Zhang J J, Wang Y Q, Zhong W, 2016. Impact of vertical wind shear and moisture on the organization of squall lines[J]. Chin J Atmos Sci, 40(4):689-702(in Chinese).
- 张培昌,魏鸣,黄兴友,等,2018.双线偏振多普勒天气雷达探测原理与应用[M].北京:气象出版社. Zhang P C, Wei M, Huang X Y, et al, 2018. Detection Principle and Application of Dual Linear Polarization Doppler Weather Radar[M]. Beijing: China Meteorological Press(in Chinese).
- 郑媛媛,俞小鼎,方翀,等,2004.一次典型超级单体风暴的多普勒天气雷达观测分析[J].气象学报,62(3):317-328. Zheng Y Y, Yu X D, Fang C, et al, 2004. Analysis of a strong classic supercell storm with Doppler weather radar data[J]. Acta Meteor Sin, 62(3):317-328(in Chinese).
- Andra D L, 1997. The origin and evolution of the WSR-88D meso cyclone recognition nomogram[C]//Preprints, 28th Conf. on Radar Meteorology. Austin, TX: Amer Meteor Soc:364-365.
- Atkins N T, Bouchard C S, Przybylinski R W, et al, 2005. Damaging surface wind mechanisms within the 10 June 2003 Saint Louis bow echo during BAMEX[J]. Mon Wea Rev, 133(8):2275-2296.
- Aydin K, Seliga T A, Balaji V, 1986. Remote sensing of hail with a dual linear polarization radar[J]. J Climate Appl Meteor, 25(10):1475-1484.
- Balakrishnan N, Zrnić D S, 1990. Use of polarization to characterize precipitation and discriminate large hail[J]. J Atmos Sci, 47(13):1525-1540.
- Browning K A, 1962. Cellular structures of convective storms[J]. Meteor Mag, 91:341-350.
- Browning K A, Foote G B, 1976. Airflow and hail growth in supercell storms and some implications for hail suppression[J]. Quart J Roy Meteor Soc, 102(433):499-533.
- Donaldson R J, 1970. Vortex signature recognition by a Doppler radar[J]. J Appl Meteor, 9(4):661-670.
- Kumjian M, Picca J, Ganson S, et al, 2010. Three-body scattering signatures in polarimetric radar data[R]. NOAA/NSSL Rep:12.
- Lemon L R, 1998. The radar "three-body scatter spike": An operational large-hail signature[J]. Wea Forecasting, 13(2):327-340.
- Miller L J, Tuttle J D, Foote G B, 1990. Precipitation production in a large Montana hailstorm, airflow and particle growth trajectories [J]. J Atmos Sci, 47(13):1619-1646.
- Park H S, Ryzhkov A V, Zrnić D S, et al, 2009. The hydrometeor classification algorithm for the polarimetric WSR-88D; description and application to an MCS[J]. Wea Forecasting, 24(3):730-748.
- Sachidananda M, Zrnić D S, 1987. Rain rate estimates from differential polarization measurements[J]. J Atmos Ocean Technol, 4(4):588-598.
- Seliga T A, Bringi V N, 1976. Potential use of radar differential reflectivity measurements at orthogonal polarizations for measuring precipitation[J]. J Appl Meteor, 15(1):69-76.
- Zrnić D S, 1987. Three-body scattering produces precipitation signature of special diagnostic value[J]. Radio Sci, 22(1):76-86.